УДК 614.8

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ЗАЩИТА — ОБЪЕКТ — СРЕДА» [1]

Ю. В. Есипов, М. С. Джиляджи, Н. С. Маматченко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, РФ

yu-yesipov5@yandex.ru
mufa86@mail.ru
voleybol1.94@mail.ru

В рамках факторного параметрического моделирования разработан и апробирован алгоритм расчета вероятностной меры возникновения происшествия на уровне величины ниже доли процента в статистически плохо изученной технической системе «защита — объект — среда». Получены аналитические и расчетные табличные зависимости вероятности наступления происшествия на уровне значений от 10–7 в функции от приведенного параметрического запаса безопасности на интервале изменения от –5 до +5. Сделаны численные оценки показателей безопасности на практически значимой области анализа: математическое ожидание воздействия «меньше» или «намного меньше» восприимчивости, на которой разброс значений приведенного параметрического запаса безопасности u ≥ 1. Для варианта воздействия «больше» или «намного больше» восприимчивости получены расчетные значения вероятности происшествия, которые могут быть полезны для прогноза системы с учетом экстремальных воздействий. Проведена демонстрация возможности применения параметрической моде-ли «воздействие — восприимчивость» в диапазоне возникновения вершинных исходов от травмы (заболевания) до критического или летального исхода.

UDC 614.8

DEVELOPMENT OF CALCULATION ALGORITHM OF THE PROBABILITY SAFETY INDEX OF THE TECHNICAL SYSTEM "PROTECTION - OBJECT - ENVIRONMENT" [2]

Y. V. Esipov, M .S. Dzhilyadzhi, N .S. Mamatchenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

yu-yesipov5@yandex.ru
mufa86@mail.ru
voleybol1.94@mail.ru

In the framework of factorial parametric modeling the authors have developed and tested the algorithm for calculating the probability of incident occurrence on the level which is below one percent in statistically not enough studied technical system "protection — object — environment". The authors produced analytical and calculation table dependencies of incidents occurrence probability at the level of values from 10-7 in the function from the parametric safety margin in the interval changes from — 5 to + 5. Numerical evaluation of safety indicators on the practically important region of analysis was made: the mathematical expectation of the impact is "less" or "much less" than the susceptibility, the spread of the given values for parametric safety mar-gin is u ≥ 1. For the option where the impact is "more" or "much more" than the susceptibility the authors calculated the values of incidents occurrence probability, which may be useful for system forecast with regard to extreme impacts. The authors performed the demonstration of the possible use of the parametric model "influence — susceptibility" in the range of occurrence of apical outcomes from injury (disease) to a critical one, or death.

[1]Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 03-07-90084-в, 07-08-07009-д, 14-08-00546-а.
[2]The research is done within the frame of the RFBR 03-07-90084-v, 07-08-07009-d, 14-08-00546-a.

Ключевые слова: безопасность, система «защита — объект — среда», происшествие, вероятностная мера, параметрическая модель «воздействие — восприимчивость».

Keywords: Safety, "protection — object — environment" system, incident, probability measure, parametric model "influence – susceptibility ".

Введение. Одной из актуальных задач является решение проблемы предсказуемости и (или) оценки вероятности возникновения происшествия (заболевание, несчастный случай, авария, катастрофа) на уровне величины ниже доли процента в статистически плохо изученной технической системе [1–4].

Вслед за большинством исследователей определим безопасность как свойство технической и технологической системы не допустить с некоторой вероятностью возникновения в ней происшествий [3, 5, 6].

Оценка и прогноз безопасности системы зависят от глубины детализации раскрытия компонентов системы «защита — объект — среда», а также от степени изученности, полноты и достоверности информации о предпосылках происшествий, факторах и их связях относительно рассматриваемых вершинных исходов [7, 8, 9].

Изначально количественная оценка безопасности сложной системы была основана на применении логики каузальной (предопределенность) (Клир, Поспелов) или логики казуальной (стохастичность или непредсказуемость) (Рябинин, Острейковский). При этом оценивать меру реализации происшествия в системе берутся либо по предопределенно взятым в системе составу элементов, факторам и связям, либо по вариантам плохо предсказуемых сценариев [10–12].

Очевидно, что концепция приемлемого риска уникальных систем предполагает методическое объединение предопределенности структурных связей компонентов и неполной предсказуемости областей варьирования параметров факторов и характеристик объекта системы [9, 13, 14–16]. Вследствие этого концепция приемлемого риска получила дальнейшее развитие на основе разработки и применения двух взаимодополняющих

Introduction. One of the urgent tasks is to solve the problem of predictability and (or) assessment of the probability of occurrence of the incident (illness, accident, crash, disaster) at the level of magnitude below the fraction of a percent in a statistically poorly studied technical system [1-4].

Following the majority of researchers we define safety as a property of technical and technological system to avoid a chance of occurrence of incidents in it [3, 5, 6].

Assessment and prediction of system security depend on the depth of detailed understanding of the components of the system "protection — object — environment", as well as the degree of knowledge, completeness and accuracy of the information on the preconditions of accident, factors and their relationship with respect to the considered apical outcomes [7, 8, 9].

Initially, quantitative safety assessment of a complex system was based on the application of causal logic (determinism) (Klir, Pospelov) or casual logic (randomness or unpredictability) (Ryabinin, Ostreykovskiy). The possibility of incidents in the system is assessed either according to pre-determined in the system set of elements, factors and relations, or according to the options of not predictable scenarios [10-12].

It is obvious that the concept of acceptable risk of unique systems involves methodical combination of predetermination of the structural relationships of the components and the incomplete predictability of the variation ranges of parameters of the factors and characteristics of the object system [9, 13, 14-16]. As a result, the concept of acceptable risk was further developed through the development and application of two complementary methods:

методов:

1) логико-вероятностного метода анализа и оценки безопасности типовых систем;

2) логико-возможностного метода экспресс-оценки уникальных систем.

Формулировка задачи. Для конкретной технической системы «защита — объект — среда» алгоритм определения и последующего расчета показателей безопасности состоит из следующих этапов или задач [13, 17–21]:

1) выбрать вершинный исход,

2) установить его предпосылки,

3) построить лингвистическую модель реализации вершинного исхода,

4) построить логическую модель с учетом, по возможности, полного набора связей предпосылок,

5) для каждой предпосылки построить параметрическую модель ее реализации на основе модели «воздействие — ослабление — восприимчивость»,

6) на основе выбора (обоснования) для нее производных параметров, с учетом проведения инженерной экспертизы конкретно взятой технической системы ТС1 в рамках (терминах) модели «воздействие — ослабление — восприимчивость» составить таблицы значений «ядер» и интервалов «размытости»,

7) рассчитать вероятностные и (или) возможностные меры (ВМ) реализации элементарных предпосылок,

8) построить вероятностную и (или) возможностную форму функции реализации вершинного исхода,

9) подставить в нее вероятностные и (или) возможностные меры реализа-ции элементарных предпосылок и получить итоговый результат в виде значения вероятности и (или) возможностной меры реализации вершинного исхода в рассматриваемой ТС1.

Как правило, задачи 1, 2 и 3 носят исследовательский характер и могут быть решены экспертом или искусственной интеллектуальной системой (ИИС) на основе полного и точного анализа конкретной технической системы с позиции ее потенциальной опасно-

1) logical-and-probabilistic method of analysis and safety assessment of typical systems;

2) logical-and-possibility method of rapid assessment of unique systems.

Formulation of the problem. For specific technical systems "protection — object — environment" the detection algorithm and the subsequent calculation of safety indicators consist of the following steps or tasks [13, 17-21]:

1) to choose an apical outcome,

2) to determine its preconditions,

3) to build a linguistic model of implementation of the apical outcome,

4) to build a logical model, taking into account, if possible, a complete set of relations preconditions,

5) for each of the precondition to build a parametric model of its implementation on the basis of "effects — weakening - susceptibility",

6) to make a table of values of "cores" and "blur" intervals basing on the selection (justification) of the arbitrary parameters for it, taking into account the engineering expertise of the particular technical system TS1 in the framework of (terminology) of the model "impact — weakening — susceptibility",

7) to calculate the probability and (or) possibility measures (PM) of realization of the basic preconditions,

8) to build a probability and (or) possibility shape of realization functions of the apical outcome,

9) to substitute it into the probabilistic and (or) possibility measures of realization of the basic preconditions and to obtain the final result in the form of value of probability and (or) possibility measures of realization of the apical outcome in the considered TS1.

Typically, tasks 1, 2 and 3 are exploratory in nature and can be solved by an expert or artificial intelligent system (AIS) on the basis of full and accurate analysis of a specific technical system from the viewpoint of its poten-

сти самой себе, другим подсистемам (надсистемам) или окружающей среде.

После проведения этих этапов далее техническая система рассматривается в следующем виде: «потенциально опасный объект как конструкция и функциональное устройство, содержащее совокупность потенциально опасных элементов различной физико-химической природы — внешние и внутренние (вторичные) опасные и (или) вредные факторы — правовые, организационные, технические и конструктивные способы и средства защиты — исполнители».

В рамках данной работы рассматривается ход и результаты решения задач 5 и 7.

Установление меры определенности вершинного исхода на основе параметрического критерия «воздействие больше восприимчивости». Моделирование и причинно-следственный анализ наступления вершинного исхода в системе можно описать на основе системно-технического изучения физико-химических его предпосылок путем выбора и описания факторных параметрических моделей вида «нагрузка — несущая способность», «воздействие — восприимчивость». При этом чаще всего реализацию вершинного исхода оценивают по условию превышения параметра или величины воздействия s над восприимчивостью r: (s > r). В зависимости от точности, полноты и достоверности информации о возможных реализациях величин s и r в рассматриваемой системе «защита — объект — среда» мера определенности реализации вершинного исхода или условия превышения может быть представлена как мера необходимости n = Nec (t), или мера вероятности p =Pro (t), или мера возможности π = Pos (t). При нормировке на интервале вещественных чисел [0, 1] для одного отдельно взятого критерия эти меры находятся в следующем отношении [2, 9, 11]:

$$Nec\ (s > r) < Pro\ (s > r) < Pos\ (s > r) \qquad (1)$$

Здесь под s, r соответственно понимаются величины (параметры) параметрической модели реализации вершинного исхода: в опе-

tial danger to itself, other subsystems (super-systems) or the environment.

After carrying out these stages the technical system is considered in the following form: "potentially dangerous object as a structure and functional device that contains a set of potentially dangerous items of different physical and chemical nature — external and internal (secondary) hazardous and (or) harmful factors — legal, organizational, technical, and constructive ways and means of protection — performers".

In this work the authors discuss the progress and results of solving tasks 5 and 7.

Determination of measures of certainty of the apical outcome based on parametric criterion "impact is more than susceptibility". Modeling and causal analysis of the occurrence of the apical outcome in the system can be described on the basis of system-technical study of its physical and chemical preconditions by selection and descriptions of factor parametric models of the "load - bearing capacity", "impact — susceptibility". The realization of the apical outcome is usually estimated by the condition of exceeding the parameter or the magnitude of the impact s on the susceptibility r: (s > r). Depending on the accuracy, completeness and reliability of information about possible realizations of the quantities s and r in the system "protection — object — environment" certainty measure of realization of the apical outcome or the excess condition can be represented as a measure of necessity n = Nec (t), or a measure of probability p =Pro (t), or a measure of possibility π = Pos (t). When normalized on the interval of real numbers [0, 1] for a single criterion these measures are in the following relation [2, 9, 11]:

$$Nec\ (s > r) < Pro\ (s > r) < Pos\ (s > r) \qquad (1)$$

Here s and r respectively refer to the variables (parameters) of parametric model of the realization of the apical outcome: in the opera-

раторе Nec — детерминированные; в операторе Pro — случайные; в операторе Pos — нечеткие величины (параметры).

Если система «защита — объект — среда» детерминирована, то мера принимает одно из двух значений: 0 или 1.

Если система «защита — объект — среда» случайна и известны плотности распределения вероятности φ (s) и φ (r) случайных величин s и r, то вероятность реализации условия ($s \geq r$) находят на основании построения вероятностной параметрической модели «воздействие s — восприимчивость r» с использованием модели превышения воздействия над восприимчивостью (рис. 1).

tor Nec — determinate; in the operator Pro — random; in the operator Pos — fuzzy variables (parameters).

If the system "protection — object — environment" is determined, the measure takes one of the two values: 0 or 1.

If the system "protection — object — environment" is random and we know probability density functions φ (s) and φ (r) of random variables s and r, the probability of the condition realization ($s \geq r$) is determined basing on constructing of a probabilistic parametric model "the impact s — susceptibility r" using a model when impact is more than susceptibility (Fig. 1).

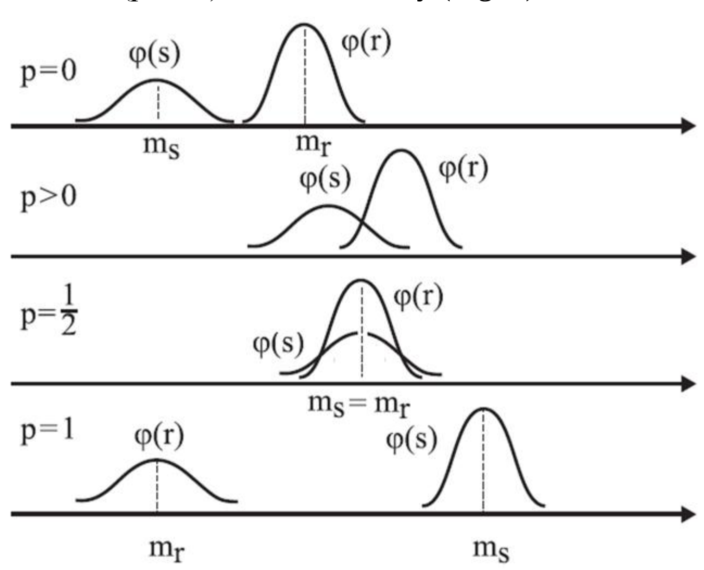


Рис. 1. Иллюстрация основных вариантов соотношения случайных параметров воздействия и восприимчивости

Fig. 1. Illustration of the main types of ratios of random parameters of impact and susceptibility

На рис. 1 представлены четыре основных варианта соотношения величин. Верхняя линия демонстрирует вариант: воздействие намного меньше восприимчивости, и пересечение кривых φ (s) и φ (r) невозможно; вероятность возникновения нежелательного исхода, то есть реализации происшествия, равна нулю, $p = 0$. Следующая линия ($p > 0$) демонстрирует вариант «приближения снизу» вероятных значений параметра воздействия ***s*** к вероятным значениям параметра восприимчивости ***r***. Третья линия ($p = 0{,}5$) описыва-

Fig. 1 shows the four main options of values ratio. The top line shows the option: the impact is far less than the susceptibility, and the intersection of the curves φ *(s)* and φ *(r)* is impossible; the probability of an undesirable outcome, i.e. the realization of incident is zero, $p = 0$. The next line ($p > 0$) is a variation of "approximation from below" of probable values of the impact parameter ***s*** to the probable values of the parameter of the susceptibility *r*. The third line ($p = 0{,}5$) describes the case of

ет случай равенства математических ожиданий воздействия m_s и восприимчивости m_r. Попутно здесь следует заметить, что среднеквадратические отклонения воздействия ***s*** и восприимчивости ***r*** могут не совпадать. Наконец, нижняя линия описывает случай, когда математическое ожидание воздействия m_s намного больше математического ожидания восприимчивости m_r, и при любых значениях среднеквадратических отклонений воздействия ***s*** и восприимчивости *r* пересечение кривых φ (*s*) и φ (*r*) невозможно. Рассмотренные варианты соотношения параметров воздействия и восприимчивости позволяют наглядно и ускоренно оценивать вероятность реализации параметрической предпосылки любого вершинного исхода.

На основе рассмотренной на рис. 1 параметрической модели определим вероятность превышения воздействия *s* над восприимчивостью *r*: Pro $(s > r)$.

Введем новую переменную $z = s - r$, которая распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $m_z = m_s - m_r$, и представим задачу в виде

$$\text{Pro}\,(s - r > 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi\,(r)\left[\int_{-\infty}^{s} \varphi\,(s)\,ds\right]dr. \quad (2)$$

Сначала рассмотрим первый вариант условия задачи: математическое ожидание случайного воздействия меньше математического ожидания случайной восприимчивости (см. вторую линию на рис. 1):

$$m_s < m_r \rightarrow m_z = m_s - m_r < 0. \quad (3)$$

Введем функцию распределения вероятности $\varphi_z(z)$ и на основании табулированного интеграла вероятностей Φ (*x*) [22] с учетом (3) выражение (2) представим в виде:

$$p_1(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0{,}5 - \Phi((m_r - m_s) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}) = 0{,}5 - \Phi\,(u), \quad (4)$$

где параметр $u = (m_r - m_s)/(\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}$ представляет собой вероятностный «приведенный параметрический запас безопасности» (ППЗБ) как отношение разности математических ожиданий воздействия и восприимчивости к их суммарному среднеквадратическому отклонению.

equality of mathematical expectations of the impact of m_s and the susceptibility m_r. At the same time it should be noted that the standard deviation of impact *s* and susceptibility ***r*** may not coincide. Finally, the bottom line describes the case when the mathematical expectation of the impact m_s is much more than the mathematical expectation of the susceptibility m_r, and at any values of standard deviations of impact ***s*** and susceptibility ***r*** the intersection of the curves φ *(s)* and φ *(r)* is impossible. The considered options of parameters correlation of impact and susceptibility make it possible to assess the probability of parametric preconditions for any apical outcome.

According to the described in Fig. 1 parametric model we define the probability of the impact s exceeding the susceptibility *r*: Pro *(s > r).*

We introduce a new variable z = s – r which is normally distributed by normal law with mathematical expectation *mz* = *ms* – *mr*, and we present the task as

$$\text{Pro}\,(s - r > 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi\,(r)\left[\int_{-\infty}^{s} \varphi\,(s)\,ds\right]dr. \quad (2)$$

First, let’s consider the first option of the problem condition: the mathematical expectation of the random impact is less than the mathematical expectation of the random susceptibility (see second line in Fig. 1):

$$m_s < m_r \rightarrow m_z = m_s - m_r < 0. \quad (3)$$

We introduce the probability distribution function $\varphi_z(z)$ and on the basis of the tabulated probability integral Φ (x) [22] taking into account (3) the expression (2) will be as follows:

$$p_1(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0{,}5 - \Phi((m_r - m_s) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}) = 0{,}5 - \Phi\,(u), \quad (4)$$

where the $u = (m_r - m_s)/(\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}$ represents the probability of "given parametric safety margin" as the ratio of the difference of

Рассмотрим второй вариант решения задачи (2), когда математическое ожидание случайного воздействия больше математического ожидания случайной восприимчивости:

$$ms > mr \rightarrow mz = ms - mr > 0. \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (2) получим в виде:

$$p_2(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0{,}5 + \Phi((m_s - m_r) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}) = 0{,}5 + \Phi(u). \quad (6)$$

Заметим, что замена условия «меньше» на «больше» в выражениях (3) и (5) сопровождается заменой знака:

$$(m_s - m_r) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5} = -(m_r - m_s) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5} = -u. \quad (7)$$

При этом очевидно, что если положительная величина ($+u$) есть характеристика «запаса безопасности», то отрицательная величина ($-u$) выражает наличие и нарастание «опасности» при дальнейшем росте величины воздействия [23].

Найдем вероятности $p_1(u)$ и $p_2(u)$ численно. Для этого из таблицы значений интеграла вероятностей (функции Лапласа) последовательно выбираем значения приведенного параметрического запаса безопасности $u = 0; 1; 2; 3; 4; 5$. Затем находим значения $\Phi(x = u)$, которые сведем в табл. 1.

mathematical expectations of the impact and susceptibility to their combined standard deviation

Let's consider the second solution to the problem (2) when the mathematical expectation of a random impact is more than the mathematical expectation of a random susceptibility:

$$ms > mr \rightarrow mz = ms - mr > 0. \quad (5)$$

Taking into account (5) the expression (2) will become:

$$p_2(u) = \text{Pro}(z > 0) = 0{,}5 + \Phi((m_s - m_r) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5}) = 0{,}5 + \Phi(u). \quad (6)$$

It should be noted that the replacement of "less" to "more" in the expressions (3) and (5) is followed by the replacement of the sign:

$$(m_s - m_r) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5} = -(m_r - m_s) / (\sigma^2_r + \sigma^2_s)^{0{,}5} = -u. \quad (7)$$

It is obvious that if the positive value $(+u)$ is a characteristic of a "safety margin", then the negative value $(-u)$ expresses the presence and growth of "danger" with a further increase of the impact value [23].

Let's find the probability $p_1(u)$ and $p_2(u)$ numerically. To do this from the table values of the probability integral (Laplace's function) we subsequently choose the given parametric values of safety margin, $u = 0; 1; 2; 3; 4; 5$. Then we find the values $\Phi(x = u)$, which are summarized in table. 1.

Таблица 1 / Table 1.

Вероятность реализации вершинного исхода Pro ($s > r$)
Probability of the apical outcome realization Pro ($s > r$)

u	$p_1(u)\|(m_r > m_s)$	$p_2(u)\|(m_s > m_r)$
0	0,5	0,5
1	0,15866	0,84134
2	0,02275	0,97725
3	0,00145	0,99865
4	0,0000317	0,999683
5	0,0000001867	0,9999997133

В табл. 1 представлены результаты расчета значений вероятности реализации вершинного исхода Pro ($s > r$) в функции от

Table. 1 shows the results of calculation of probability values of the apical outcome reali-

приведенного параметрического запаса безопасности *u* для двух различающихся вариантов соотношений математических ожиданий воздействия и восприимчивости (1): ($m_r > m_s$) и (2): ($m_s > m_r$).

С учетом зависимости (7) и данных табл. 1 получено табличное выражение вероятности реализации вершинного исхода ***P*(*u*)** в функции от приведенного параметра ***u*** на интервале его изменения от –5 до +5 (табл. 2).

zation *Pro (s > r)* in the form of the function of the parametric safety margin *u* for two different options of ratio of mathematical expectations of impact and susceptibility (1): ($m_r > m_s$) и (2): ($m_s > m_r$).

Taking into account the dependence (7) and table 1 data we got the table expression of the probability of the apical outcome *P(u)* as a function of the given parameter u in the interval of its changes from -5 to +5 (table. 2).

Таблица 2/ Table 2

Вероятность наступления происшествия в функции от приведенного параметрического запаса безопасности и принятом условии превышения «воздействие больше восприимчивости»

The probability of incidents occurrence as a function of the given parametric safety margin and the accepted condition of exceeding "the impact is more than susceptibility"

№	***u***	***P*(*u*)**
1	– 5	0,9999997133
2	– 4	0,999683
3	– 3	0,99865
4	– 2	0,97725
5	– 1	0,84134
6	0	0,5
7	1	0,15866
8	2	0,02275
9	3	0,00145
10	4	0,0000317
11	5	0,0000001867

На основании табл. 2 путем интерполяции легко получить численные оценки показателей безопасности на практически значимой области анализа [24]: математическое ожидание воздействия «меньше» или «намного меньше» восприимчивости, а разброс значений приведенного параметрического запаса безопасности $u \geq 1$. Применение результатов варианта (2): воздействие «больше» или «намного больше» восприимчивости полезно для проведения прогноза системы с учетом экстремальных воздействий [25].

Используя шаг расчета ***u*** = 0,1, на основании описанного подхода получим численное значение вероятности реализации вершинного исхода ***P*(*u*)** на интервале изменения параметра ***u*** от 0 до 1, который используется для оценки возможностной меры происшествия.

On the basis of table 2 by interpolation it is easy to obtain a numerical assessment of safety performance for the practically important region of analysis [24]: mathematical expectation of the impact is "less" or "much less" than susceptibility, and the spread of values of the given parametric safety margin is $u \geq 1$. Application of the option results (2): the impact is "more" or "much higher" than susceptibility helps to conduct a forecast of a system with regard to extreme impacts [25].

Using the calculation step ***u*** = *0,1*, based on the described approach we get the numerical value of the probability of the apical outcome ***P(u)*** on the parameter space ***u*** from 0 to 1, which is used to evaluate possible measures of

При этом для сравнения и расчета используем зависимости нормальной $\pi n(u)$ и линейной πL аппроксимации возможностной меры [9]:

$$\pi\, n_\alpha = e^{-k_e\left(\frac{\bar{r}_l - \bar{s}_h}{\Delta_\alpha s + \Delta_\alpha r}\right)^2} = e^{-k_e \cdot (zb_\alpha)^2}, \quad (8)$$

где $k_e = k/2$, а значения коэффициента k_e = 4, 5; 8; 12, 5 соответствуют значениям коэффициента k = 3; 4; 5 в функции ошибок (табл. 3).

the accident. In addition, for comparison and calculation we use dependencies of the normal $\pi n(u)$ and πL linear approximation of possible measures [9]:

$$\pi\, n_\alpha = e^{-k_e\left(\frac{\bar{r}_l - \bar{s}_h}{\Delta_\alpha s + \Delta_\alpha r}\right)^2} = e^{-k_e \cdot (zb_\alpha)^2}, \quad (8)$$

where $k_e = k/2$, and the values of the coefficient k_e = 4, 5; 8; 12, 5 correspond to the values of the coefficient k = 3; 4; 5 as a function of the errors (table. 3).

Таблица 3 / Table 3

Сводная таблица значений вероятности вершинного исхода $P(u)$ и возможностной меры в нормальной $\pi n(u)$ и линейной πL аппроксимации

Summary table of probability values of the apical outcome $P(u)$ *and possible measures in normal* $\pi n(u)$ *and* πL *linear approximation*

u	*P(u)*	*πn*	*πL*
0	0,5	1	1
0,1	0,46	0,956	0,9
0,2	0,42	0,835	0,8
0,3	0,38	0,666	0,7
0,4	0,34	0,486	0,6
0,5	0,32	0,324	0,5
0,6	0,30	0,197	0,4
0,7	0,26	0,110	0,3
0,8	0,21	0,056	0,2
0,9	0,19	0,026	0,1
1,0	0,156	0,011	0

Чаще всего экспертиза безопасности проводится в условиях отсутствия точной и (или) полной информации о предпосылках возникновения происшествий в технической системе. Поскольку «параметр воздействия» — это характеристика «среды», то эксперт для его нахождения использует расчетно-аналитические способы. Тогда как «параметр восприимчивости» — выраженная в терминах и величинах параметров воздействия характеристика способности объекта (или субъекта) к возникновению в системе происшествия (вершинного исхода). Причем параметры восприимчивости устанавливают, как правило, экспериментально.

В качестве параметров восприимчивости

Often the examination of safety is carried out without any accurate and (or) complete information on the occurrence preconditions of accidents in a technical system. As the "impact parameter" is characteristic of the "environment", to find it the expert uses computational and analytical methods. And the "sensitivity parameter" is the characteristic of the possibility of the object (or subject) to incidents occurrence in the system (apical outcome) expressed in terms of values and impact parameters. The susceptibility parameters are set, as a rule, experimentally.

The experts take the following indicators as

эксперты принимают следующие показатели:

1) предельно допустимая концентрация вредного газа (г/м^3), или доза излучения (Дж/кг или Рентген), или продолжительность пребывания (с или час);

2) пятидесятипроцентный критический порог воздействия (размерность по аналогии с предыдущими показателями);

3) среднее фибрилляционное значение тока (мА);

4) напряжение начала текучести материала твердого тела (Па).

Следует заметить, что, как правило, эксперт способен установить такого рода параметры воздействия и восприимчивости в виде нечетких интервалов с указанием уровня различимости.

4. Расширение и унификация области применения параметрической модели «воздействие — ослабление — восприимчивость». Для демонстрации достижимости унификации оценки безопасности проведем совмещение параметрической модели «воздействие — восприимчивость» на двух (и более) уровнях ($s_1 < s_2$) или ($s_1 << s_2$):

$$(s_1 - r_1),\ (s_2 - r_2). \quad (9)$$

Здесь уровень r_1 — «ощутимая» восприимчивость или порог заболевания человека, выраженный параметром воздействия; уровень r_2 — критическая восприимчивость к «внутреннему» (ослабленному защитой) воздействию.

$$s = f \cdot v. \quad (10)$$

Здесь f — заданная на интервале вещественных чисел [0, 1] функция (коэффициент) ослабления «внешнего» воздействия v на двух уровнях защиты, где, например, $f_1 = 0{,}001$ — практически полное ослабление воздействия; $f_2 = 0{,}01$ — ослабление воздействия до уровня 1 % (удовлетворительная защита); $f_2 = 0{,}1$ — ослабление воздействия до уровня 10 % (плохая защита).

На рис. 2 представлена развертка по оси одного воздействующего фактора с применением вероятностной параметрической модели «воздействие — восприимчивость» и

the parameters of the susceptibility:

1) maximum permissible concentration of harmful gas (g/m3) or dose (j/kg or Roentgen) or the duration (seconds or hours);

2) fifty percent critical threshold of impact (the dimension in analogy with the previous figures);

3) average fibrilation current value (mA).

4) voltage of the material fluidity start of the solid body (PA).

It should be noted that, as a rule, the expert is able to set the parameters of influence and susceptibility in the form of fuzzy intervals, indicating the level of distinctness.

4. Extension and unification of the scope of parametric model "impact — weakening — susceptibility". To demonstrate the achievability of the harmonization of the safety assessment we did a combination of parametric model "influence — susceptibility" at two (or more) levels ($s_1 < s_2$) or ($s_1 << s_2$):

$$(s_1 - r_1),\ (s_2 - r_2). \quad (9)$$

Here, the level r_1 is the "tangible" sensitivity or threshold of human infection expressed by the parameter of impact; the level r_2 is the critical sensitivity to "internal" (protection weakened) effects.

$$s = f \cdot v. \quad (10)$$

Here f is defined on interval of real numbers [0, 1] function (coefficient) of weakening of "external" impact v at the two levels of protection, where, for example, f_1 = 0,001 is the almost complete weakening of the impact; f_2 = 0.01 is the weakening of the impact to a level of 1 % (satisfactory protection); f_2 = 0.1 is the weakening of the impact to a level 10 % (poor protection).

Fig. 2 presents an axis scan of one influencing factor with the use of the probabilistic parametric model "impact — susceptibility" and functions of the density probability φ *(s)* and φ

функций плотности вероятности φ (*s*) и φ (*r*) случайных параметров воздействия s и восприимчивости *r*.

(*r*) of random parameters of impact *s* and susceptibility *r*.

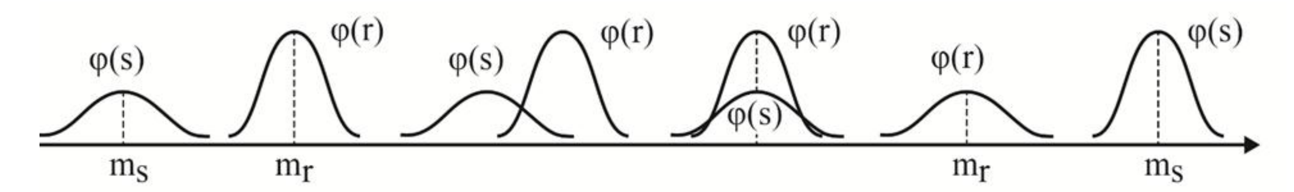


Рис. 2. Демонстрация возможности применения параметрической модели «воздействие — восприимчивость» в диапазоне возникновения вершинных исходов от травмы (заболевания) до критического или летального исхода

Fig. 2. Demonstration of the possible use of parametric model "impact susceptibility" in the range of occurrence of apical outcomes from injury (disease) to a critical or fatal outcome

При этом принимается, что в рассматриваемых зависимостях (9), (10) и на рис. 2 каждый воздействующий фактор ослабляется монотонно.

Заключение. В рамках факторного параметрического моделирования разработан и апробирован алгоритм расчета вероятностной меры возникновения происшествия на уровне величины ниже доли процента в плохо статистически изученной технической системе «защита — объект — среда».

Получены аналитические и расчетные табличные зависимости вероятности наступления происшествия на уровне значений от 10^{-7} в функции от приведенного параметрического запаса безопасности на интервале изменения от –5 до +5. Приведены численные оценки показателей безопасности на практически значимой области анализа: математическое ожидание воздействия «меньше» или «намного меньше» восприимчивости, на которой «разброс» значений приведенного параметрического запаса безопасности $u \geq 1$. Получены результаты для варианта воздействие «больше» или «намного больше» восприимчивости, которые могут быть полезны для проведения прогноза системы с учетом экстремальных воздействий.

Проведена демонстрация возможности применения параметрической модели «воздействие — восприимчивость» в диапазоне

In this case, it is assumed that in the considered dependencies (9), (10) and in Fig. 2 each influencer is weakened monotonically.

Conclusion. In the framework of factorial parametric modeling the authors have developed and tested the algorithm for calculating a probability measure of the occurrence of incident at the level magnitude below one percent in statistically badly studied technical system "protection — object — environment".

They have obtained analytical and calculation table dependencies of the probability of occurrence of accidents at the level of values from 10^{-7} of the function from the parametric safety margin in the variation interval from -5 to +5. The paper provides the numerical estimation of safety parameters in practically important region of analysis: the mathematical expectation of the impact is "less" or "much less" than the susceptibility, which "scatter" the values of the given parametric safety margin $u \geq 1$. The results were obtained for the option of the impact of "more" or "much more" than the susceptibility, which can be useful for the system forecast taking into account extreme impacts.

A demonstration of the possible use of parametric model "impact susceptibility" in the range of occurrence of apical outcomes from

возникновения вершинных исходов от травмы (заболевания) до критического или летального исхода.

injury (disease) to a critical or fatal outcome was carried out.

Библиографический список

1. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. М. Черкесов. — Москва : Радио и связь, 1981. — 263 с.
2. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — Москва : Наука, 1986. — 288 с.
3. Острейковский, В. А. Вероятностное прогнозирование работоспособности ЯЭУ / В А. Острейковский, Н. Л. Сальников. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 316 с.
4. Антонов, А. В. Риск-информативный подход к обеспечению без-опасности эксплуатации энергоблоков атомных станций / А. В. Антонов, Г. А. Ершов, О. И. Морозова // Безопасность в техносфере. — 2013. — Т. 2. — № 1. — С. 14–19.
5. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность сложных систем / И. А. Рябинин // Санкт-Петербург : Политехника, 2000. — 248 с.
6. Волик, Б. Г. О концепциях техногенной безопасности // Автоматика и Телемеханика. — 1998. — № 2. — С. 12–17.
7. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. — Москва : Наука, 1978. — 410 с.
8. Гаенко, В. П. Современные методы анализа и оценки безопасности сложных технических систем / В. П. Гаенко. — Санкт-Петербург : НИЦ БТС, 2004. — 212 с.
9. Есипов, Ю. В. Мониторинг и оценка риска систем «защита — объект — среда» / Ю. В. Есипов, Ф. А. Самсонов,

References

1. Ryabinin I.A., Cherkesov G.M. Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh system. [Logical and probabilistic methods of structurally complex systems reliability research.] Moscow: Radio i svyaz’, 1981, 263 p. (in Russian).
2. Pospelov D.A. Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika. [Situational management: theory and practice.] Moscow: Nauka, 1986, 288 p. (in Russian).
3. Ostreykovskiy V.A., Salnikov N.L., Veroyatnostnoe prognozirovanie rabotosposobnosti yadernoy energeticheskoy ustanovki. [Probabilistic forecasting of nuclear power plant performance.]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 316 p. (in Russian).
4. Antonov A.V. Ershov G. A., Morozova O. I. Risk-informativnyy podkhod k bezopasnosti eksplyatatsii energoblokov atomnykh stantsiy. [Risk-information approach to power units safety assurance in nuclear power plants.] Bezopasnost’ v tekhnosfere, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 14-19 (in Russian).
5. Ryabinin I.A. Nadezhnost’ i bezopasnost’ slozhnykh sistem. [Reliability and safety of complex systems.] Saint Petersburg: Polytechnika, 2000, 248 p. (in Russian).
6. Volik B.G. O Kontseptsiyakh tekhnogennoy bezopasnosti. [On the concepts of technogenic safety] Avtomatika i Telemekhanika, 1998, no. 2, pp. 12-17 (in Russian).
7. Buslenko N. P. Modelirovanie slozhnykh sistem. [Modeling of complex systems.] Moscow: Nauka, 1978, 410 p. (in Russian).
8. Gaenko V.P. Sovremennye metody analiza i otsenki bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem. [Modern methods of analysis and safety assessment of complex technical systems.] Saint Petersburg: NITS BTS, 2004, 212 p. (in Russian).
9. Esipov Y.V., Samsonov F.A., Cheremisin A.I. Monitoring i otsenka riska sistem "zashchita - ob’ekt’ - sreda". [Monitoring and risk

А. И. Черемисин. — 3-е изд. — Москва : Изд-во ЛКИ — УРСС, 2013. — 138 с.

10. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс, и техногенная безопасность. В 2 ч. / Н. А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2005. — Ч. 1. — 494 с. ; Ч. 2. — 610 с.

11. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. — Москва : Радио и связь, 1990. — 422 с.

12. Белов, П. Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности / П. Г. Белов. — Москва : ГНТП «Безопасность» ; МИБ СТС, 1996. — 428 с.

13. Майструк, А. В. Системный анализ и моделирование потенциально опасных технологических процессов / В. С. Боркин, А. В. Майструк // Безопасность в техносфере. — 2014. — Т. 3, № 3. — С. 3–8.

14. Махутов, Н. А. Использование сценарного анализа для оценки прочностной надежности сложных технических систем / Н. А. Махутов, Д. О. Резников // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2015. — № 1. — С. 5–13.

15. Есипов, Ю. В. Разработка метода системного анализа потенциальной опасности комплекса «технический объект — нерегламентированные факторы окружающей среды» / Ю. В. Есипов, А. П. Лапсарь // Надежность и контроль качества. — 1997. — № 11. — С. 48–56.

16. Есипов, Ю. В. Постановка и пути решения проблемы оценки риска сложных техногенных систем / Ю. В. Есипов // Управление риском. — 2003. — № 1. — С. 38–43.

17. Есипов, Ю. В. Задача нахождения возможностной меры аварии в уникальной техногенной системе / Ю. В. Есипов // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2003. — № 1. — С. 40–44.

assessment of "protection — object — environment" systems, 3rd ed.] — Moscow: Publishing house LKI, URSS, 2013, 138 p. (in Russian).

10. Makhutov N. A. Konstruktsionnaya prochnost’, resurs, i technogennaya bezopasnost’, v dvukh chastyakh. [Structural strength, resource and technogenic safety, in 2 parts] Novosibirsk: Nauka, 2005, part 1, 494 p., part 2, 610 p. (in Russian).

11. Klir Dzh. Sistemologiya. Avtomatizatsiya resheniya sistemnykh zadach. [Systemology. Automation of system tasks.] Moscow: Radio i svyaz’, 1990, 422 p. (in Russian).

12. Belov P. G. Teoreticheskie osnovy sistemnoy inzhenerii bezopasnosti. [Theoretical foundations of systems engineering safety.] Moscow: GNTP "Bezopasnost’", MIB STS, 1996, 428 p. (in Russian).

13. Maystruk A.V., Borkin V.S. Sistemnyy analiz i modelirovanie potentsial’no opasnykh tekhnologicheskikh protsessov. [System analysis and simulation of potentially dangerous technological processes.] Bezopasnost’ v tekhnosfere, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 3-8 (in Russian).

14. Makhutov N.A., Reznikov D.O. Ispol’zovanie stsenarnogo analiza dlya otsenki prochnostnoy nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem. [The use of scenario analysis to evaluate the strength reliability of complex technical systems.] Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii, 2015, no. 1, pp. 5-13 (in Russian).

15. Esipov Y.V., Lapsar A.P. Razrabotka metoda sistemnogo analiza potentsial’noy opasnosti kompleksa "tekkhnicheskiy ob’ekt – nereglamentirovannye fakrory okruzhayushchey sredy". [Development of a system analysis method of potential hazards of the complex "technical object — independent environmental factors".] Nadezhnost’ i kontrol’ kachestva, 1997, no. 11, pp. 48-56 (in Russian).

16. Esipov Y.V. Postanovka i puti resheniya problem otsenki riska slozhnykh tekhnogennykh sistem. [Formulation and solution to the problems of risk assessment of complex technological systems] Upravlenie riskom, 2003,

18. Есипов, Ю. В. Концепция возможностной оценки риска техногенных систем / Ю. В. Есипов // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 7. — С. 5–12.
19. Есипов, Ю. В. Моделирование опасностей и установление меры определенности происшествия в системе / Ю. В. Есипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2003. — № 3. — С. 112–117.
20. Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. — Москва : Мир, 1989. — 286 с.
21. Стрелецкий, Н. С. Основы статистического учета коэффициента за-паса прочности сооружений / Н. С. Стрелецкий. — Москва : Стройиздат, 1967. — 232 с.
22. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — Москва : Наука, 1974. — 832 с.
23. Порецкий, П. С. Решение общей задачи теории вероятностей при помощи математической логики / П. С. Порецкий // Тр. Казанской секции физ.-мат. наук. Сер. 1. — 1987. — Т. 5. — С. 112–118.
24. Есипов, Ю. В. Моделирование и визуализация зон риска системы на основе критерия «воздействие — восприимчивость» / Ю. В. Есипов, Ю. В. Горшкова, Р. И. Шишкин // Вестник Южного научного центра. —2010. — Вып. 3, т. 6. — С. 21–28.
25. Kafka, P. Probalistic Safety assessment (PSA) technology — how it works, what does it do, where are the gabs / P. Kafka // Safety and reliability assessment — an Integral Approach : proc. of the European Safety and reliability Conference in Munich, 10th — 12th May 1993. — Amsterdam ; New York ; Tokyo : Elsevier, 1993. — P. 303–

no. 1, pp. 38-43 (in Russian).
17. Esipov Y.V. Zadacha nakhozhdeniya vozmozhnostnoy mery avarii v unikal’noy tekhnogennoy sisteme. [Problem of finding the possible incident degree in a unique technological system.] Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii, 2003, no. 1, pp. 40-44 (in Russian).
18. Esipov Y.V. [Concept of technological systems possibility risk assessment.] Avtomatika i telemekhanika, 2003, no. 7, pp. 5-12 (in Russian).
19. Esipov Y. V. Modelirovanie opasnostey i ustanovlenie mery opredelennosti proisshestviya v sisteme. [Risks modeling and establishment of certainty degree of incidents in the system.] Problemy mashinostroeniya, 2003, no. 3, pp. 112-117 (in Russian).
20. Dyubua D., Prad A. Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniya k predstavleniyu znaniy v informatike. [Theory of possibilities. Application to knowledge representation in computer science.] Moscow: Mir, 1989, 286 p. (in Russian).
21. Streletskiy N.S. Osnovy statisticheskogo ucheta koeffitsienta zapasa prochnosti sooruzheniy. [Fundamentals of safety margin statistical factor.] Moscow: Stroyizdat, 1967, 232 p. (in Russian).
22. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike. Dlya nauchnykh rabotnikov i inzhinerov. [Handbook on mathematics. For scientists and engineers.] Moscow: Nauka, 1974, 832 p. (in Russian).
23. Poretsky P.S. Reshenie obshchey zadachi teorii veroyatnostey pri pomoshchi matematicheskoy logiki. [Solution to the general problem of probability theory with mathematical logic.] Proc. of Kazan section of phys.-math. sciences, ser. 1, 1987, vol. 5, pp.112-118 (in Russian).
24. Esipov Y.V., Gorshkova Y.V., Shishkin R.I. Modelirovanie i vizualizatsiya zon riska sistemy na osnove kriteriya "vozdeystvie – vospriimchivost’". [Modeling and visualization of the risk zones of the system based on the "impact — susceptibility" criterion.] Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra, 2010, is. 3,

403.

vol. 6, pp. 21-28 (in Russian).

25. Kafka P. Probalistic Safety assessment (PSA) technology — how it works, what does it do, where are the gabs. Safety and reliability assessment — an Integral Approach: proc. of the European Safety and reliability Conference in Munich, 10th — 12th May 1993. Amsterdam, New York, Tokyo. Elsevier, 1993, pp. 303–403.

Поступила в редакцию 25.10.2016
Сдана в редакцию 25.10.2016
Запланирована в номер 15.12.2016

Received 25.10.2016
Submitted 25.10.2016
Scheduled in the issue 15.12.2016

Есипов Юрий Вениаминович,
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1) yu-yesipov5@yandex.ru

Джиляджи Мустафа Сервинович,
аспирант Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
mufa86@mail.ru

Маматченко Николай Сергеевич,
магистрант Донского государственного технического университета (РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
daedwardrambler.ru@mail.ru

Yuri Veniaminovich Esipov, Doctor of technical Science, Professor, Department of life safety and environmental protection, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
yu-yesipov5@yandex.ru

Alexey Viktorovich Panfilov,
Postgraduate-student, Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
mufa86@mail.ru

Nikolay Sergeevich Mamatchenko,
Graduate student, Don State Technical University, (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
daedwardrambler.ru@mail.ru